

床固め直下流部の局所洗掘過程のモデル化

道上 正規・鈴木 幸一・川津 幸治

MODELING OF LOCAL SCOUR PROCESSES DOWNSTREAM OF A CONSOLIDATION WORK ACROSS A RIVER CHANNEL

By *Masanori* MICHIEUE, *Koichi* SUZUKI and *Koji* KAWATSU

Synopsis

A consolidation work, which may be called a submerged sill, is constructed across a river channel in order to prevent the river bed from being lowered due to a dam construction. The stability of its foundation should not be threatened by the local scour downstream of the sill. In this study, characteristics of the scouring process downstream of a consolidation work are discussed experimentally and analytically, using a simplified flow model. The flow downstream of a submerged sill has two patterns; submerged jet and undular jump. In the state of submerged jet, the main flow is deflected downwards and sweeps along the bed with a roller near the water surface. On the other hand, in the state of undular jump, the main flow is shifted to the water surface and a roller is formed near the scour hole bed. These two flow patterns appear alternately in the scouring process. Modifying these two flow patterns under some assumptions based on the experimental facts, the distribution of the bed shear stress in the scour hole is estimated and the variation of the scour depth with time and place is simulated by solving numerically the equation of continuity of the bed sand under the non-equilibrium state of sand discharge.

1. 緒 言

河床低下の防止軽減を目的として、河道を横断して設置される床固めが十分にその機能を発揮するためには、床固めの基礎の安定が保障されている必要がある。床固め直下流部においては、床固めを越流した流れが変化し、信濃川の大河津分水路でみられるように条件によっては 10 m にも及ぶ局所洗掘深が生じる。したがって、局所洗掘現象の内部機構の解明は、床固め基礎の根入れ深さの決定あるいは洗掘防止軽減法を考える上で非常に重要である。従来、床固め下流部の流掘状況に似ている水門下流部の洗掘¹⁾や水平噴流による洗掘²⁾などの研究はかなりなされ、その特性は明らかになってきているが、天端を現河床面と一致させた床固め下流部の局所洗掘現象はそれらとは若干異なる。すなわち、水門からの水平噴流と床固めのような低い堰を越す流れとは流況が大きく異なることや、床固めの場合その上流水位と下流水位との水位差があまり大きくないため洗掘形状の微妙な変化によって水流水脈が波状跳水状態となったり潜り噴流状態になったり大きく変化することなど、水門下流部などの場合とはかなり違っている。

床固め直下流部の流れと局所洗掘について、著者ら³⁾はすでに実験的に検討し、最大洗掘深の時間変化、洗掘孔形状特性および流速分布特性を明らかにしている。本論文では、実験的に得られたこれらの知見を、あは程度の実験に基づく仮定のもとにモデル解析を行ないことによって説明する。すなわち、洗掘の進行過程を、洗掘深が極く小さい初期洗掘過程と、潜り噴流による激しい洗掘と波状水脈の鉛直下方に形成されるローラーの逆流による埋め戻しの繰返しである後期洗掘過程のそれぞれについて、非平衡状態における流砂の連続条件に基づく基礎式を導き、それを数値計算する。計算によって得られた最大洗掘深および洗掘孔形状の時間的変化を実測値と比較検討することによって、モデル解析の妥当性を検証する。

2. 床固め直下流部の局所洗掘過程

2.1 実験の概要

水路を横断して設置された床固め直下流部における局所洗掘現象の諸特性に関する知見を得るため、主に洗掘孔形状、最大洗掘深の時間変化に関する移動床実験と、洗掘孔内の流況および流速特性を知るための固定床実験を行なった。

実験に用いた水路は、Fig. 1 に示すように長さ 15 m、幅 40 cm、深さ 40 cm の長方形断面の鋼製水路であるが、両側壁は透明ガラスとなっている。この水路上流端を 0 m として下流 5 m から 10 m 区間は固定床（床固め）とし、その下流部 5 m 区間を移動床として、この移動床部の局所洗掘深の時間的変化を測定するが、通水初期には床固めの天端と移動床面は同一高さとしている。河床形状の測定は自動河床面測定器および水路側面からの写真撮影とを併用して行なった。また、水面形の測定はサーボ式水位計によって行ない、流速測定は 5 孔球形ピトー管の原理を利用して二次元の流速が測定できるように試作したピトー管を用いてなされたが、その際動圧と静圧の差は差圧計を用いて測定した。固定床実験における河床面応力の推定はプレストン管⁴⁾による流速測定によって行なった。

移動床実験における実験条件は、Table 1 に示すとおりであって、水路勾配 i は 1/200 の一定とし、単位幅流量 q を 100 cm²/s から 320 cm²/s の範囲で変化させた Run 1 から Run 7 までの 7 ケースである。実験に使用した砂は粒度分布の範囲が比較的小さい中央粒径 d_{50} が 0.064 cm のほぼ均一な砂であって、Fig. 2 にその粒径分布および諸特性が示されている。Table 1 の中で、 h_c は限界水深、 g は重力加速度、 h_0 は等流水深である。

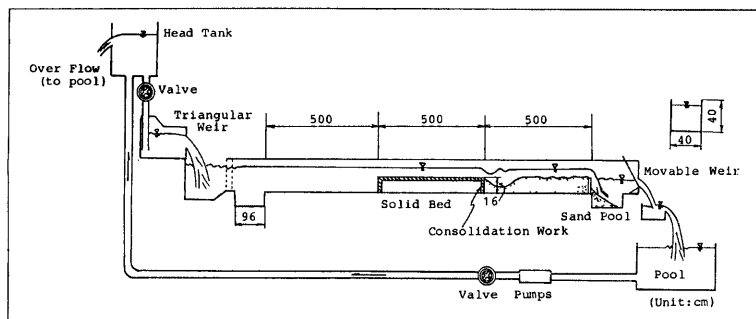


Fig. 1 Experimental flume.

Table 1 Experimental conditions.

Run	q (cm ² /sec)	h_c (cm)	$u_c(=\sqrt{gh_c})$ (cm/sec)	h_0 (cm)	$u(=q/h_0)$ (cm/sec)	i_0	K	d_{50} (cm)	d_{50}/h_c	reference
1	140	2.80	52.38	3.10	45.16	1/200	30.0	0.064	0.0229	$L_1=500(\text{cm})$
2	240	3.67	59.97	4.01	52.37	1/200	45.0	0.064	0.0174	$L_2=500(\text{cm})$
3	280	4.45	66.04	4.83	57.97	1/200	60.0	0.064	0.0144	$\lambda=0.4$
4	320	4.86	69.01	5.27	60.72	1/200	68.6	0.064	0.0132	$s=1.65$
5	300	4.65	67.51	5.05	59.41	1/200	64.3	0.064	0.0138	$n=0.017$
6	250	4.12	63.54	4.49	55.68	1/200	53.6	0.064	0.0155	movable and
7	290	3.55	58.98	3.89	51.41	1/200	42.9	0.064	0.0180	solid bed

2.2 洗掘過程³⁾

床固め直下流部の局所洗掘過程を実験によって観察すると、洗掘初期には **Photo. 1** に示すように洗掘孔が浅く、流れは局所的に著しくは曲がっていない状態で流下方向に比較的広範囲に洗掘が進行する。通水初期より後述するような潜り噴流による急激な洗掘が起こるまでのこのような洗掘過程を初期洗掘過程と名付ける。洗掘が進み洗掘深が増大すると床固め直下流部の流れは急に潜り噴流となり、主流水脈はあまり拡散されず鉛直下向きに河床に沿うように潜り込むため、この強い掃流力によって深き方向に卓越した洗掘が生じる。さらにその流掘された砂が洗掘孔内の下流部に堆積し、砂堆部を形成する (**Photo. 2**)。この潜り噴流による洗掘が進行して洗掘孔内下流部の砂堆が大きくなると流れは突然上向きとなり、主流水脈は水面近くに移行し波状状態となる。このとき、河床面近くに形成されたローラーによる

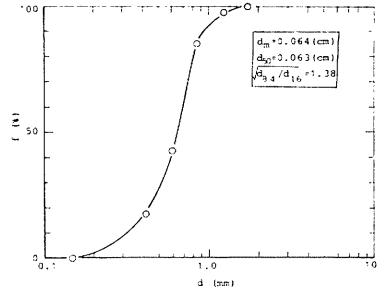


Fig. 2 Size frequency distribution of used sand.



Photo. 1 Profile of scour hole and water surface (Initial scouring process).

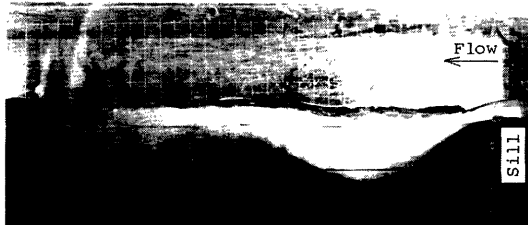


Photo. 2 Profile of scour hole and water surface (Scouring process with submerged jet).

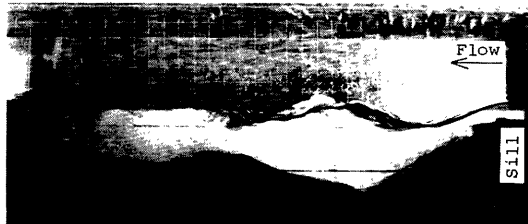


Photo. 3 Profile of scour hole and water surface (Piling process with undular jump).

逆流によって洗掘孔内に形成された砂堆が徐々に削り取られてその上流部の深い洗掘孔を埋め戻す (Photo. 3)。この埋め戻しがさらに進み、砂堆部が平たくになりながら徐々に上流に移動しその先端が洗掘孔の上流側斜面にはば達すると流れは再び潜り噴流となって激しい洗掘が生じる。以後このような洗掘と埋め戻しを繰り返すながら洗掘が徐々に進行するが、このような状態を後期洗掘過程と呼ぶことにする。

3. 洗掘過程のモデル化

3.1 初期洗掘過程

Fig. 3 は初期洗掘過程における流速分布の一例を示したものである。主流水脈は床固め下流端で剥離し、下流で河床に再接触するが、洗掘孔は浅く流下方向に長い形状をしているため、主流水脈は比較的レベルに近い。床固めと再接触点との間の河床面近くには弱い逆流域が形成されている。断面最大流速は水面近くで生じるが、再接触点よりやや下流では河床近くの流速が比較的大きくなっていることが認められる。しかし、再接触点より下流での流速は巨視的にみると対数流速分布から大きくかけはなれているというようなことはない。

初期洗掘過程における洗掘孔形状と流況を模式的に描いたが Fig. 4 であって、床固め下流端 (O 点) で剥離した水脈は、水平となす角度が $\alpha (\approx 10^\circ)$ で拡がりながら R 点で河床面に再接触する。図中、 ϕ は砂の水中安息角、 z_{st} は全体的な河床低下量、 h_0 は等流水深、 h は局所水深 ($\equiv h_0 + z_s - z_{st}$)、 z_s は元河床からの洗掘深、 x および x' はそれぞれ床固め下流端 (O) および再接触点 (R) を原点とする流下方向距離である。以下、非平衡状態の流砂量^{2),5)}を考慮して再接触点より下流側の河床変動に関する基礎式を導く。再接触点より上流側の河床付近には弱い逆流域が形成されており、この逆流による河床への擾乱によって巻き上げられる単位時間当たりの砂量 $q_p(x_R - x_A)$ は、剥離域 ($\equiv x_R - x_A$) での砂が単位時間当たりに pick up される確率の平均 $\bar{p}_s(0)$ を用いると、

$$q_p(x_R - x_A) = A_1 d \cdot \bar{p}_s(0) \cdot (x_R - x_A) \dots\dots\dots(1)$$

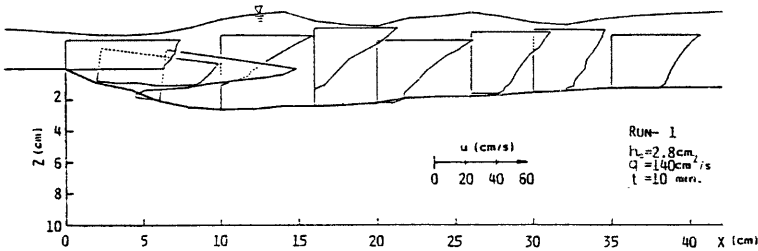


Fig. 3 Velocity distributions (Initial scouring process).

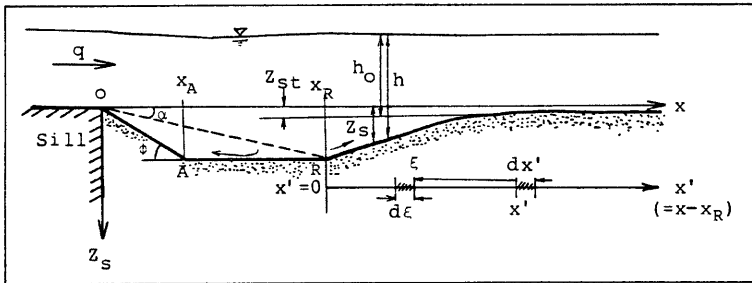


Fig. 4 Notations (Initial scouring process).

と表わせる。ここに、 d は砂粒径、 $A_1d=k_3(\pi d^3/6)/k_2(\pi d^2/4)$ 、 k_2 および k_3 はそれぞれ砂粒子の二次元および三次元の形状係数である。冲刷域で高く巻き上げられた砂は主流に取り込まれ下流に流送されるので、いま (1) 式で表わされる砂量があたかも $x'=0$ の点から pick up されるものと仮定すると、単位時間当りに $x'\sim x'+dx'$ 区間に deposit する砂量 $dq_d(x')$ およびそこから pick up される砂量 $dq_p(x')$ はそれぞれ、

$$dq_d(x')=A_1d \cdot dx' \left\{ \int_0^{x'} \rho_s(x'-\xi) \cdot f(\xi) d\xi + \widetilde{\rho}_s(0) \cdot (x_R-x_A) \cdot f(x') \right\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$dq_p(x')=A_1d \cdot dx' \cdot \rho_s(x') \quad \dots\dots\dots(3)$$

と表わされる。ここに、 $\rho_s(x'-\xi)$ および $\rho_s(x')$ はそれぞれ $x'-\xi$ 地点および x' 地点における砂が単位時間当りに pick up される確率であり、 $f(\xi)$ は pick up された砂の跳躍距離の確率密度関数である。なお、砂の移動時間は無視しており、 $f(\xi)$ は砂の平均跳躍距離を L とすると、

$$f(\xi)=(1/L) \cdot \exp(-\xi/L) \quad \dots\dots\dots(4)$$

では表わされ、 $L \simeq 100d/(1-\rho_s(\xi))$ である^{9),10)}。一方、流砂の連続式は、 q_B を各点の流砂量とし、 z_s を鉛直下向きに正とすると、

$$\frac{\partial z_s}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \cdot \frac{\partial q_B}{\partial x'} \quad \dots\dots\dots(5)$$

で表わされる。ここに、 λ は砂の空隙率である。 $dq_B=dq_p(x')-dq_d(x')$ であるから、(5) 式に (2) 式および (3) 式を代入すると、

$$\frac{\partial z_s}{\partial t} = \frac{A_1d}{1-\lambda} \left\{ \rho_s(x') - \int_0^{x'} \rho_s(x'-\xi) \cdot f(\xi) d\xi - \widetilde{\rho}_s(0) \cdot (x_R-x_A) \cdot f(x') \right\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。ここで、 $x=x_R$ における z_s と $x_A \sim x_R$ 区間の z_s が等しくなるという接続条件を考えるが、(6) 式で $x'=0$ の z_s を考えると、

$$\frac{\partial z_s(0)}{\partial t} = \frac{A_1d \cdot \widetilde{\rho}_s(0)}{1-\lambda} = \frac{A_1d}{1-\lambda} \left\{ \rho_s(0) - \widetilde{\rho}_s(0) \cdot (x_R-x_A) \cdot f(0) \right\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

であるから、

$$\widetilde{\rho}_s(0) = \frac{\rho_s(0)}{\{1+(x_R-x_A) \cdot f(0)\}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

となる。一方、 $q_{B0}(x')$ を $x'=x'$ における河床面せん断応力に対応する平衡状態の流砂量とすると、

$$q_{B0}(x')=\rho_s(x')A_1d \int_0^\infty f(\xi')d\xi'=\rho_s(x') \cdot A_1d \cdot L \quad \dots\dots\dots(9)$$

である。(8) 式および (9) 式の関係を (6) 式に代入すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_s}{\partial t} = & \frac{1}{1-\lambda} \cdot \frac{1}{L} \left\{ q_{B0}(x') - \int_0^{x'} q_{B0}(x'-\xi) \cdot \frac{1}{L} \exp\left(-\frac{\xi}{L}\right) d\xi \right. \\ & \left. - \frac{q_{B0}(0)}{1+(x_R-x_A)} \cdot (x_R-x_A) \cdot \frac{1}{L} \exp\left(-\frac{\xi}{L}\right) \right\} \quad \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

で示される再接触点 (R) より下流における河床変動に関する基礎式が得られる。

再接触点より下流 ($x=x'$) での各地点における掃流力に対する平衡状態の流砂量 q_{B0} を計算する際には、各地点の摩擦速度 u_* が与えられなければならない。初期洗掘過程においては、実験で示されたように洗掘孔が浅く流れはほとんどわん曲していないので流速分布が便宜的に対数分布則を示すものとし、 $v/u_* = 6.0 + 5.75 \log_{10}(h/k_s)$ とすると、 $x'=x'$ での摩擦速度 $u_*(x')$ は、

$$u_*(x') = \frac{q}{h_0+z_s-z_{st}} \cdot \frac{1}{6.0+5.75 \log_{10}\{(h_0+z_s-z_{st})/k_s\}} \quad \dots\dots\dots(11)$$

となる。ここに、 $v=q/h$ 、 $h=h_0+z_s-z_{st}$ 、 $k_s(k \cdot d)$ 、 k (一定) は相当粗度で、 q は単位幅流量である。

3.2 後期洗掘過程

1) 潜り噴流による洗掘過程

後期洗掘過程のうち、潜り噴流による洗掘時における洗掘孔形状と流況を模式的に示したものが、Fig. 5である。床固め下流端 (O 点) で剥離した主流水脈は、潜り噴流となって R 点で河床に再接触し、その点から下流では河床に沿って流れる。このような主流水脈と水面との間にローラーが形成されている。また、床固め下流端と再接触点 R の間の河床勾配は砂の水中安息角にほぼ保たれている³⁾。R 点より上流から下流への給砂はほとんどないとみなせるから、R 点より下流の河床変動に関する基礎式は、(10) 式の右辺の最後の項を除いた ($q_{B0}(0)=0$ とした) 次式 (12) で与えられる。

$$\frac{\partial s_s}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \cdot \frac{1}{L} \cdot \left\{ q_{B0}(x') - \int_0^{x'} q_{B0}(x'-\xi) \cdot \frac{1}{L} \exp\left(-\frac{\xi}{L}\right) d\xi \right\} \dots\dots\dots(12)$$

Fig. 6 は、潜り噴流時の流速分布の一例を示したものであるが、この図を用いて洗掘孔中央部の砂堆頂までの流速分布を無次元表示したのが、Fig. 7 である。縦軸は流速 u をその断面の最大流速 u_{max} で無次元化

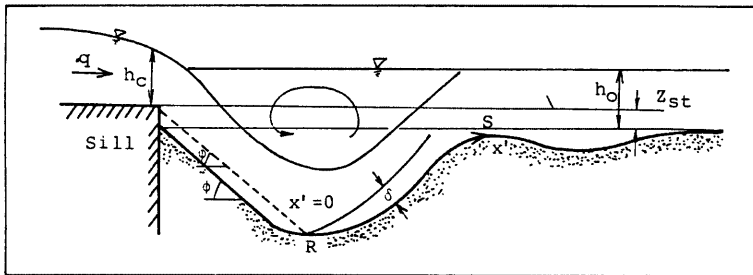


Fig. 5 Notations (Scouring process with submerged jet).

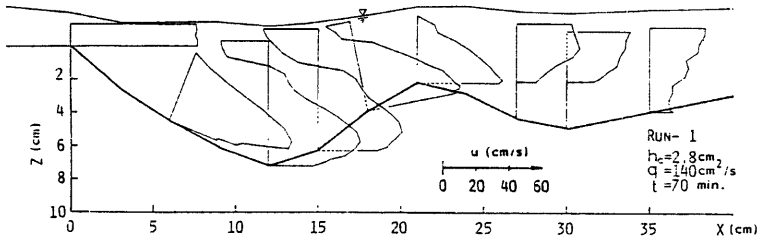


Fig. 6 Velocity distributions (Submerged jet).

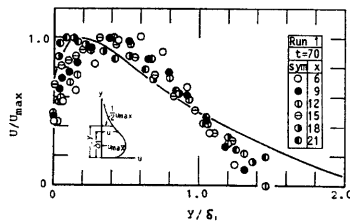


Fig. 7 Nondimensional velocity distributions (Submerged jet).

したものの、横軸は河床からの高さ y を $u = u_{max}/2$ で $\partial u / \partial y < 0$ である点の y の値 δ_1 で無次元化したものである。このように無次元化した流速分布は、洗掘孔底面付近では各断面についてはほぼ同一であることが認められる。このような特性は Rajaratnam⁹⁾ や著者ら⁹⁾ の段落ち下流部における再接触壁面噴流で得られた流速分布特性によく似ている。したがって、噴流水脈の再接触点 R から乱流境界層が河床面に沿って発達すると考えると、粗い平板上を発達する乱流境界層についての従来の研究成果がこの場合にも適用できる。 R 点を原点として、河床面に沿った流下方向の距離を x' として、 δ を x' 地点の境界層厚とすると、

$$\delta = 0.248 x' (k_s/x')^{1/4} \quad \dots\dots\dots(13)$$

であり⁹⁾、境界層外縁の流速 u_1 と摩擦速度 u_* との関係は、

$$(u_*/u_1)^2 = 0.0125 (k_s/\delta)^{1/3} \quad \dots\dots\dots(14)$$

で与えられる¹⁰⁾。なお、これらの式は等流における Manning-Strikler の式、

$$v/u_* = 7.66 (h/k_s)^{1/6} \quad \dots\dots\dots(15)$$

をその計算の途中で用いている。(13) 式および (14) 式より河床面せん断応力の無次元要素 $\tau_0/\rho u_*^2$ は、

$$\tau_0/\rho u_*^2 (\equiv u_*^2/u_1^2) = 0.02 (x'/k_s)^{-1/4} \quad (16)$$

で表わすことができる。ここで、 R 点より下流の水脈がそれほど拡散せず床固め上での水深をほぼ保っていると考えると境界層外縁流速 u_1 を $u_c (\equiv q/h_c)$ で置き換えることや、粗い平板上の境界層の発達とは少し異なっている状況などのしわよせを全て(16)式の係数(0.02)に受けもたせて実験的に検討すると、係数0.02を0.03と修正する方がよいことがわかった。すなわち、(16)式は床固め下流部では、

$$\tau_0/\rho u_c^2 = 0.03 (x'/k_s)^{-1/4} \quad \dots\dots\dots(17)$$

と書き直せる。Rajaratnam⁹⁾によれば、床固め下流部における潜り噴流に非常によく似た再接触壁面噴流では、 $\tau_0/\rho u_c^2$ の最大値は必ずしも R 点ではなくそれよりわずかに下流側にきている。そのずれの距離を Rajaratnam の実測結果を参照にして $k' h_c (k' \approx 1)$ であると仮定し、 $0 \leq x' \leq k' h_c$ の間では河床面せん断応力が直線的に0から、 $x' = k' h_c$ として(17)式を用いて得られる値まで変化するとする。以上のように(17)式を修正した結果と実験によって得られた結果を示すと、Fig. 8 のようになる。Fig. 8 の中で実線で示される河床面せん断応力分布は Fig. 5 の再接触点 R と洗掘孔の下流部に形成された砂堆部の頂点 S との間の河床に対してのみ適用できる。 S 点より下流側の河床面せん断応力は便宜的に(11)式によって算定されるものとする。

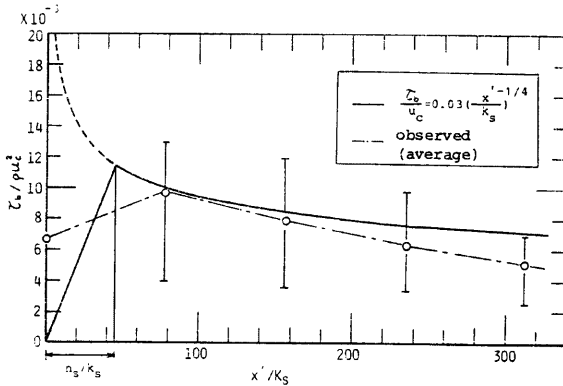


Fig. 8 Assumed distribution of bed shear stress (Submerged jet).

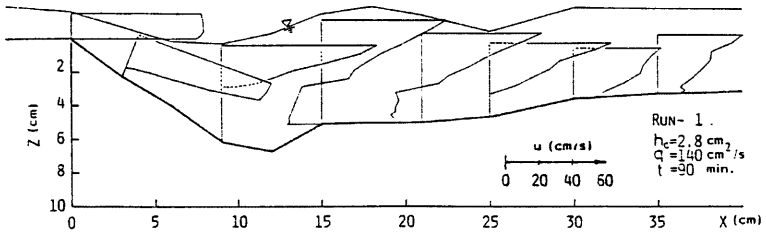


Fig. 9 Velocity distributions (Undular jump).

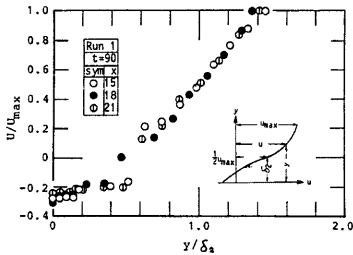


Fig. 10 Nondimensional velocity distribution (Undular jump).

2) 埋め戻し過程

埋め戻し過程における洗掘孔内の流速分布の一例を示したものが Fig. 9 であるが、主流水脈は水面付近にあり、洗掘孔底部にローラーが形成されかなり強い逆流が生じている。Fig. 10 は、Fig. 9 の流速分布をローラーが存在している断面についてのみ無次元表示をしたものである。縦軸は流速 u を各断面の最大流速 u_{max} で無次元化したものであり、横軸は河床からの高さ y を $u = u_{max}/2$ で $\partial u/\partial y > 0$ である点の y の値 δ_2 で無次元化して示してある。埋め戻し時においても、 u/u_{max} と y/δ_2 の関係は逆流域を含めて相似性がかなり保たれていることがわかる。埋め戻し過程における洗掘孔形状と流況を模式的に示したのが Fig. 11 である。

床固め下流端で剝離した主流水脈はその鉛直下方にローラーを形成しながら R 点において河床に再接触する。この再接触点 R を境にして上流側と下流側とは河床付近の流向が逆であるので、 R 点を原点 ($x'=0$) として別々に河床変動を計算する必要がある。その基礎式は、 R 点から流入砂量が 0 であるので (12) 式で与えられる。(12) 式を用いて河床変動を計算するには、逆流ローラーによる河床面せん断応力を評価しなければならないが、これを理論的に正確に求めることは困難である。ここでは、Fig. 10 で示す流速分布特性が段落下流部の流速分布特性^{3),8)}とよく似ていることから、段落下流部で実験的に得られた河床面せん断応力分布 τ_0 (上流向きが正) を示す Fig. 12³⁾ を参照して、Fig. 13 の実線で示すような τ_0 を逆流ローラー部で与えることとする。ここに、 τ_{0max} はローラー領域内の最大河床面せん断応力で、実験的に得られた。

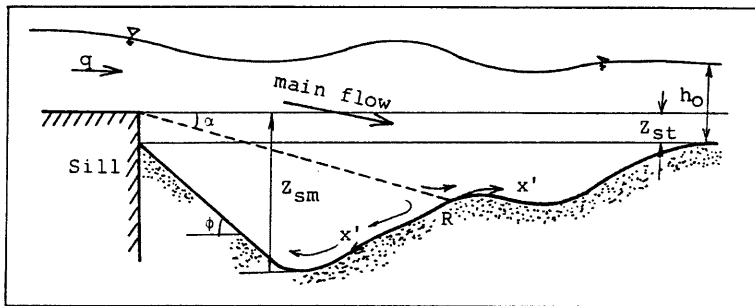


Fig. 11 Notations (Piling process with undular jump).

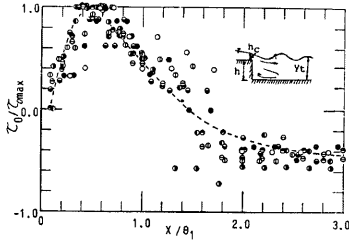


Fig. 12 Distributions of measured bed shear stress downstream of a sill.

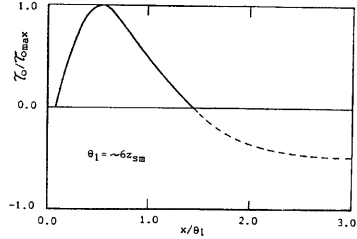


Fig. 13 Assumed distribution of bed shear stress (Undular jump).

$$y_t/h = -12.9 \log_{10}(\tau_{0max}/u_c^2) - 38.9 \quad \dots\dots\dots(18)$$

で計算される。ここに、 y_t は段落ち下流部の水深、 h は段落ち高さである。また、 x は段落ちからの流下距離、 θ_1 は $\tau_0 = \tau_{0max}/2$ で $\partial\tau_0/\partial x < 0$ の断面の段落ちからの距離であるが実験的には段落ち高さの約 6 倍では一定である。Fig. 11 の R 点より上流側の河床面せん断応力を推定しようとする場合、Fig. 12 の中の h は最大洗掘深 z_{sm} に相当し、Fig. 12 で $\tau_0 = 0$ となっている位置は Fig. 11 では再接触点 R に対応するとして Fig. 12 の点線を示す曲線を修正したのが Fig. 13 である。

なお、R 点より下流側の河床面せん断応力は (11) 式で与えられるものとする。

3.3 数値計算の方法

1) 河床全体の低下量

床固め下流部における全体的な河床低下量 z_{st} は著者ら¹¹⁾が提案した次式、

$$z_{st} = (i_0 - i_c) \left[l - \frac{2}{\gamma} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[-K \left\{ \frac{(2n+1)\pi}{2l} \right\}^2 l \right] \cdot \left\{ \frac{2l}{(2n+1)\pi} \right\}^2 \right] \quad \dots\dots\dots(19)$$

を用いて算定する。ここに、 i_0 は初期河床勾配、 i_c は砂の移動限界勾配、 l は床固めから下流の河床固定点までの距離、 K は河床変動に関する拡散係数で、 $K = (21/20) \{1/(1-\lambda)\} \cdot \varphi \cdot F(\tau_0/\tau_c) \cdot g/(s \cdot v/u_*)$ で与えられる。ただし、 φ 、 F は流砂量に関する佐藤・吉川・芦田式の中の係数、 $s = \sigma/\rho - 1$ 、 σ および ρ はそれぞれ砂および水の密度である。

2) 平衡状態の流砂量

各地点 ($x' = x'$) における掃流力に対応する平衡状態の流砂量 $q_{B0}(x')$ は、流砂量に関する芦田・道上の式¹²⁾

$$\frac{q_{B0}}{\sqrt{sgd^3}} = 17 \cdot \tau_{*c}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*} \right) \quad \dots\dots\dots(20)$$

を用いて計算する。ここに、 $\tau_* = u_*^2/sgd$ 、 u_{*c} は砂の限界摩擦速度、 $\tau_{*c} = u_{*c}^2/sgd$ 、 $\tau_{*c} \sim \tau_*$ (洗掘孔内の河床面には凹凸がない) である。ただし、(20) 式中の τ_{*c} (あるいは u_{*c}) は、洗掘孔内では斜面勾配がかなり大きいので、斜面の影響を考えて補正される必要がある。斜面勾配を θ (流下方向に下がっていけば正、反対に上がっていけば負) とすると、 $\tau_{*c}(\theta)$ は、

$$\tau_{*c}(\theta) = \tau_{*c}(0) \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sin \varphi} \right) \quad \dots\dots\dots(21)$$

と表わせる¹³⁾。ここに、 $\tau_{*c}(0)$ は $\theta = 0$ の場合の無次元限界掃流力、ここでは $\tau_{*c}(0) = 0.05$ を用いる。また、 φ は砂の水中安息角である。

3) 洗掘過程の移行条件

初期洗掘過程から後期洗掘過程の潜り噴流による洗掘過程への移行、潜り噴流による洗掘過程から埋め戻

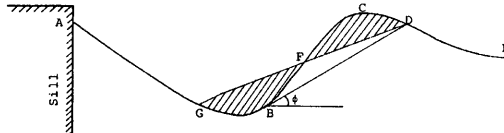


Fig. 14 Notations (Modification of bed slope).

し過程への、あるいはその逆の移行条件については、段落ち下流部で実験的に得られた式⁹⁾を床固め下流部の状態に合わせて修正した、

- i) 初期洗掘過程あるいは波状跳水から潜り噴流への移行条件

$$\frac{z_{sm}}{h_c} - 7.7 \frac{z_{st}}{h_c} \leq 7.7 \left(1 - \frac{h_0}{h_c}\right) \quad \dots\dots\dots(22)$$

- ii) 潜り噴流から波状跳水への移行条件

$$\frac{h_{sm}}{h_c} - 10 \frac{z_{st}}{h_c} > 10 \left(1 - \frac{h_0}{h_c}\right) \quad \dots\dots\dots(23)$$

を用いる。これは、段落ちの下流水深 y_f が床固め下流部の洗掘状態では、 $h_0 + z_{sm} - z_{st}$ に相当し、段落ち高さ h は最大洗掘深 z_{sm} に相当するとして得られたものである。

4) 形状補正

河床変動の計算の途中で洗掘孔内の斜面の一部が砂の水中安息角 ϕ を越えるようになった場合には、Fig. 14 に示すように、傾斜のきつくなった位置より上方の砂が洗掘孔内に滑り落ちるような補正を施す。その手順は、Fig. 14 を参照して、

- i) B 点で砂の水中安息角 ϕ のすべり線を引き、河床と交わる点 D をみつける。
- ii) 斜線で引いた B 点より上方の砂 FCD の面積と等しくなるような面積 GBF をみつける。
- iii) 補正後の洗掘孔形状は AGFDE とする。

5) 数値計算

河床変動の基礎式 (10) 式あるいは (12) 式は、直接解析的にその解を得ることができないので、数値的に解を求めなければならない。計算の際の時間ステップ Δt は原則として 5 秒としたが、後期洗掘過程の埋め戻し時で河床変動の時間的変化の小さい場合には Δt を最大 30 秒まで適宜変化させた。

4. モデルの検証

4.1 最大洗掘深の時間的変化

Fig. 15 (a)~(g) は、実験 Run 1~Run 7 で実測された最大洗掘深の時間変化とそれに対応する条件で上記のモデルを用いて得られた計算結果とを比較したものである。計算では初期洗掘過程から後期洗掘過程への移行は、(22) 式を満足するときに生じる。本実験条件では、計算結果では $\sqrt{g/h_c} \cdot t = 1 \times 10^4$ 程度で移行することになるが、実測では $\sqrt{g/h_c} \cdot t = 5 \times 10^4$ 程度で流れが潜り噴流に移行しており、実測での後期洗掘過程は計算よりかなり遅れて始まることになり、流れの移行条件は必ずしも正しく評価できていないことがわかる。ただ、全体的に計算による洗掘深が実測のものより大きめになっているものの、洗掘の進行特性はある程度計算によってシミュレートされていると考える。細かくみると、洗掘のごく初期の実測値は水路側壁部を写真によって測定したため水路中央部の洗掘深よりかなり小さいことが実験中に認められたのでこの部分を除外して考えると初期洗掘過程については計算結果は実測値に近い。後期洗掘過程の潜り噴流時の瞬間的な最大深掘れは測定できなくてやや埋め戻された状態の洗掘深を測定しているため、計算によるように洗掘深の変動が激しくない。実験時の観察によると潜り噴流時には、瞬間的には計算値と同じ様に大きく洗掘さ

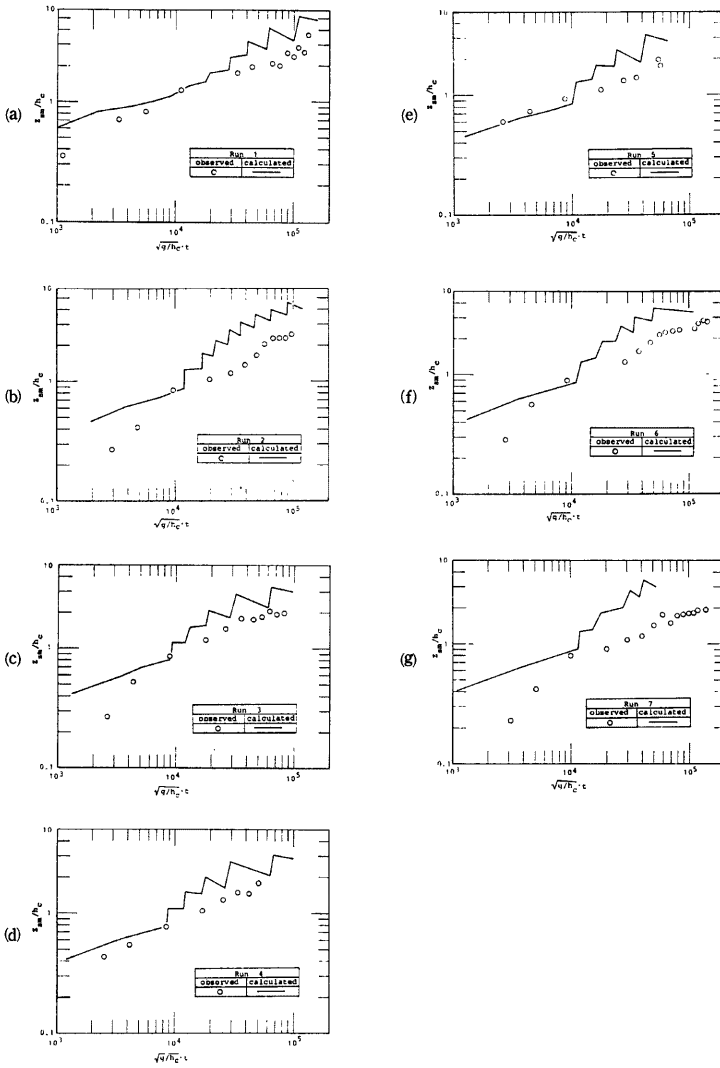


Fig. 15 Variation of nondimensional maximum scour depth with time.

れることが認められた。埋め戻しについては、後期洗掘過程の初めの頃はそれほど大きくは埋め戻しておらず、後半になるほど埋め戻し量が大きくなっている。潜り噴流および埋め戻しのそれぞれの過程の生じている時間についてみると、潜り噴流時間は実測では10秒程度から長くても60秒ぐらいまでであり、計算結果でも5秒から90秒ぐらいと比較的よく対応している。一方、埋め戻し時間については、実測結果は実験条件によって多少異なるものの平均的には20分程度となっているが、計算結果では5分程度から長いものは50分ぐ

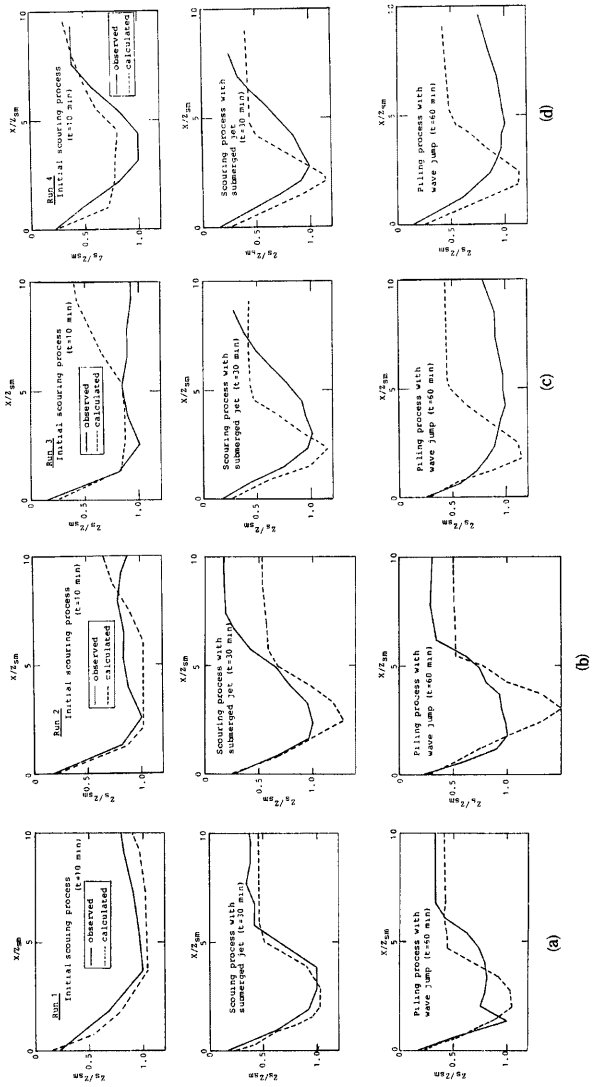


Fig. 16 (1) Comparison of calculated and observed scour hole profiles.

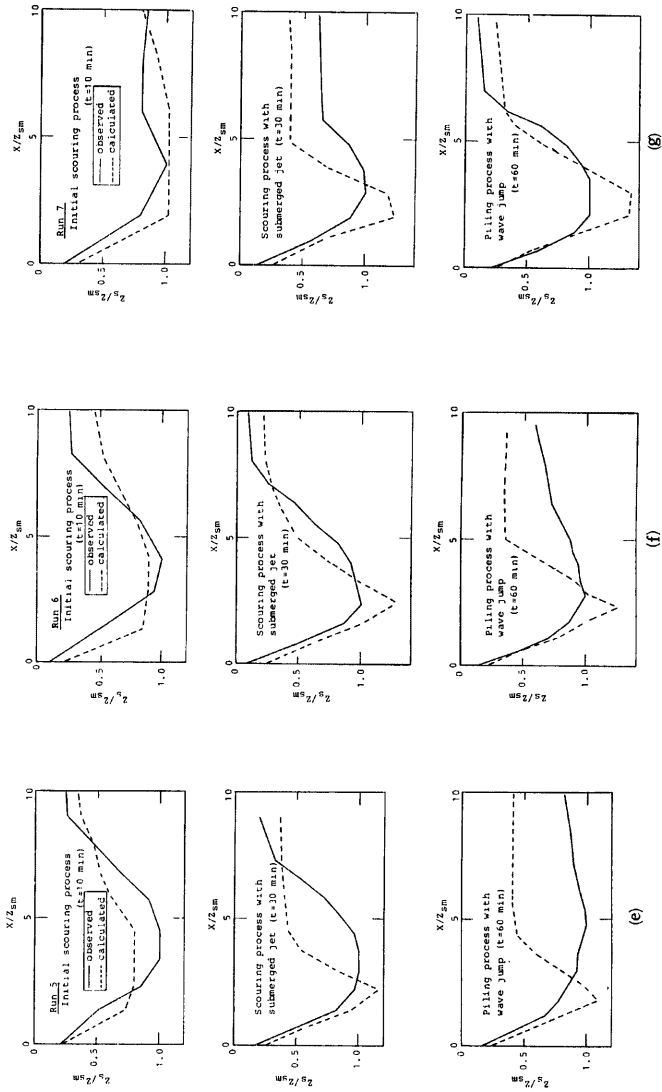


Fig. 16 (2) Comparison of calculated and observed scour hole profiles.

らいまでとばらつきがある。ただ、時間がたつほど埋め戻し時間が長くなるような特性は実測と計算とで一致している。

4.2 洗掘孔形状

Fig. 16 (a)~(g) は、実験 Run 1~Run 7 で時間 $t=10$ 分, 30分および60分における実測および計算による洗掘孔形状を示している。実測値および計算値の両方とも実測された最大洗掘深 s_{sm} で無次元化しており、実線は実測値であり点線は計算結果である。初期洗掘過程の $t=10$ 分での洗掘孔形状をみると、計算による洗掘深が実測値に比して多少小さくなっているが、初期洗掘過程の特徴である流下方向に洗掘孔が卓越する特性は計算結果の方でもみられ、その特徴をモデルはよく捉えているように思える。つぎに、潜り噴流による洗掘過程である $t=30$ 分についてみると計算による最大洗掘深は実測値よりも大きくなっており、洗掘孔長も実測に比べて短かくなっているが、鉛直方向の洗掘は実測よりも大きくなっている。鉛直方向に洗掘が卓越していることは潜り噴流過程の特徴であるので、巨視的には本モデルはある程度この特性を捉えていると考える。埋め戻し時である $t=60$ 分についてみると、Run 1 および Run 7 を除いて計算結果と実測値とはあまりよく対応していない。埋め戻し時には、洗掘孔内の下流にできた砂堆部が河床面付近に存在する逆流ローラーによって洗掘孔底部方向に移動させられ最大洗掘部が徐々に埋め戻されるが、本モデルでは埋め戻される量がかなり小さく見積られることになっている。このことは、波状跳水から潜り噴流への移行条件、つまり(23)式に問題があると考えられる。

5. 結 語

本研究では、河道を横断して設けられた床固め直下流部における局所洗掘の時間的変化を、種々の実験的事実に基づくモデル解析によって説明しようと試みたものである。流況、洗掘孔形状の複雑な場におけるモデルであるので、実験的事実に基づくある程度の大胆な仮定を導入しざるを得なかった。したがって、詳細にみると解析結果と実測値は必ずしも一致してなくて、とくに波状跳水から噴流への、あるいはその逆の流れの移行条件など、今後さらに検討すべき点は残されている。しかし、巨視的には計算結果は実測の洗掘進行過程をかなりよくシミュレートしており、ここに示したモデル解析は床固めの直下流部の局所洗掘過程の推定に役立つものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 土屋義人：水門下流部における局所洗掘に関する研究(1), 京大防災研究所年報, 1965, pp. 363~377.
- 2) 齊藤 隆：水平噴流による洗掘に関する研究, 土木学会論文報告集, 第282号, 1979, pp. 53~63.
- 3) 鈴木幸一・道上正規・川津幸治：床固め直下流部の流れと局所洗掘について, 第26回水理講演会論文集, 1982, pp. 75~80.
- 4) Patel, V. C.: Calibration of the Preston Tube and Limitations of its Use in Pressure Gradient, Jour. of Fluid Mech., Vol. 23, 1965, pp. 185~208.
- 5) 辻本哲郎：掃流過程の確率モデルと移動床問題への応用, 京大大学学位論文, 1978.
- 6) 矢野勝正・土屋義人・道上正規：砂礫の流送機構の確率過程としての特性について, 京大防災研究所年報, 第11号 B, 1968, pp. 61~73.
- 7) Einstein, H. A.: Formulas for Transportation of Bed-load, Trans. ASCE, Vol. 107, 1942, pp. 561~597.
- 8) Rajaratnam, N.: Plane turbulent reattached wall jets, Proc. ASCE, HY1, 1968, pp. 95~112.
- 9) Schlichting, H.: Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, Sixth Edition 1968.
- 10) たとえば, 椿東一郎：水理学Ⅱ, 森北出版, 1974, pp. 89.

- 11) 道上正規・鈴木幸一：床固めの水理機能に関する研究，京都大学防災研究所年報，第22号B，1979，pp. 507～519.
- 12) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，1972，pp. 59～69.
- 13) Graf, W. H.: *Hydraulics of Sediment Transport*, McGraw-Hill, 1971, pp. 84-85.